

Н. Н. Никульченков*, А. С. Юровских, М. А. Рыжков, А. Ю. Жилияков

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

**nikolai.nikulchenkov@urfu.ru*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *М. Л. Лобанов*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ТОЧЕК АМОРФНОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Fe–Si–Nb–Cu–Mo–B

Методами калориметрии, дилатометрии и терморентгеновского фазового анализа определили температурные интервалы фазовых и структурных превращений в исходно аморфном сплаве системы Fe–Si–Nb–Cu–Mo–B, полученном спиннингованием. Для скоростей нагрева 0,3...0,5 °/сек установлен температурный интервал существования данного сплава в нанокристаллическом состоянии.

Ключевые слова: аморфный сплав, кристаллизация, рекристаллизация, калориметрия, дилатометрия, терморентгеновский фазовый анализ.

N. N. Nikulchenkov, A. S. Yurovskih, M. A. Ryzhkov, A. Y. Zhilyakov

DETERMINATION OF THE CRITICAL POINTS OF THE AMORPHOUS ALLOY SYSTEM Fe–Si–Nb–Cu–Mo–B

The samples of amorphous ribbon of Fe–Si–Nb–Cu–Mo–B alloy system were studied using methods of calorimetry, dilatometry and thermo-X-ray phase analysis. The alloy was heat treated. Data about thermal effects, changes in geometric dimensions, changes in the phase composition, and about critical points are obtained. Interval of nanocrystalline state existence for heating rate 0.3...0.5 °/sec was determined.

Keywords: amorphous alloy, crystallization, recrystallization, calorimetry, dilatometry, thermo-X-ray phase analysis.

Несмотря на то, что в настоящее время магнитомягкие аморфные сплавы в виде сверхтонких лент (примерно 20 мкм) производятся в промышленных масштабах (примерно 200 000 т/год) [1], они остаются объектом пристального внимания исследователей [2]. За счет структуры и толщины подобные материалы обладают превосходными электромагнитными свойствами, такими как высокая магнитная проницаемость и низкая коэрцитивная сила. Магнитопроводы, выполненные из аморфных материалов, с успехом используются, как в обычных трансформаторах (50 Гц), так и в высокочастотных

(400...10000 Гц), где в следствие малой толщины материала в сердечнике существенно снижается вихретоковая составляющая удельных потерь при перематгничивании [3].

Состав данных сплавов подбирается так, чтобы из него можно было получить сверхтонкую аморфную ленту методом спиннингования (быстрой заковки): разливки жидкого сплава на вращающийся медный барабан.

Несмотря на уже имеющиеся свойства, одна из возможностей улучшения аморфного сплава – реализация в нем нанокристаллического состояния [4]. Сплав *Finemet* системы Fe–Si–Nb–Cu–Mo–В имеет состав для получения аморфной ленты, которая является прекурсором для получения нанокристаллического состояния посредством отжига [5].

Целью работы являлось определение температурных интервалов фазовых (кристаллизация) и структурных (рекристаллизация) переходов в исходно аморфном сплаве системы Fe–Si–Nb–Cu–Mo–В для оптимизации температурно-временных режимов его термической обработки.

В работе использовались методы калориметрии, дилатометрии и терморентгеновского фазового анализа. Дифференциальный термический анализ проводился на приборе “*Netsch STA 449 C Jupiter*” в динамической атмосфере аргона со скоростью нагрева 30 °/мин. Дилатометрические исследования проведены на закалочном дилатометре *Linseis L78 R. I. T. A.* со скоростью нагрева 20 °/мин. Терморентген фазовый анализ проводился на рентгеновском дифрактометре *Bruker ASX ADVANCE D8*.

Калориметрический анализ показал (рис. 1), что протекание фазового превращения в аморфной ленте по типу кристаллизации начинается с 523 °С и заканчивается 543 °С. При дальнейшем нагреве фиксируется еще один пик превращения при температуре 665 °С.

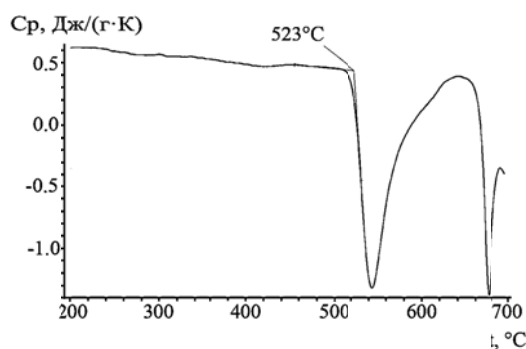


Рис. 1. Зависимость теплоемкости образца Ср от температуры t °С

Дилатометрический анализ, проведенный при более низкой скорости нагрева, показал начало фазового превращения с сильным изменением геометрических размеров при температуре около 500 °С (рис. 2). При дальнейшем нагреве или охлаждении значительных изменений размеров не наблюдалось.

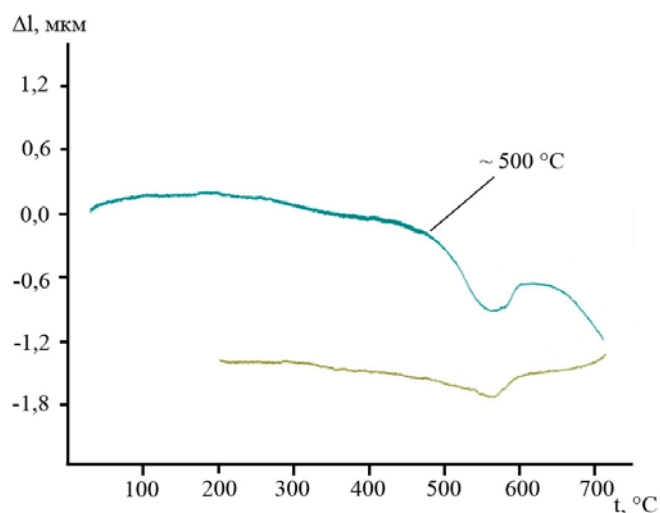


Рис. 2. Изменение геометрических размеров образца(мкм) от температуры °C

Терморентгеновский фазовый анализ показал (рис. 3), что до интервала температур 425...450 °C, дифракционная картина соответствует аморфному состоянию. В этом интервале происходит первое резкое изменение дифракционной картины. Далее пики постепенно становятся острее до интервала 625...650 °C, где следует еще одно резкое изменение. Углы 2θ самых интенсивных отражений соответствуют дифракционной картине ОЦК-железа. Последнее изменение дифракционной картины при нагреве образца указывает на происходящее в нем структурное превращение по типу рекристаллизации.

Полученная в работе информация по температурным интервалам фазовых и структурных превращений в ленте аморфного сплава Fe–Si–Nb–Cu–Mo–В обобщена в таблице.

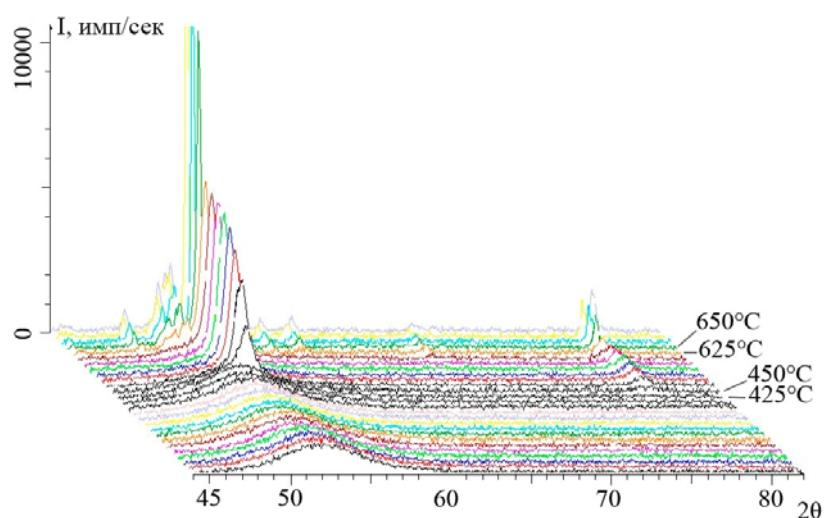


Рис. 3. Дифрактограмма образца, полученная с помощью терморентгеновского фазового анализа

**Критические точки сплава Fe–Si–Nb–Cu–Mo–B
при разных скоростях нагрева**

Метод проведения эксперимента	Скорость нагрева ($V_{\text{нагр}}$), град/с	Температура кристаллизации ($t_{\text{крист}}$), °C	Температура рекристаллизации ($t_{\text{рекр}}$), °C
Калориметрия	0,5 (30°/мин)	523	641
Дилатометрия	0,3 (20°/мин)	~ 500	–
Терморентген фазовый анализ	0,016 (1°/мин)	425-450	625-650

Таким образом, показано, что в температурном интервале 530...630 °C, при его нагреве, аморфный сплав находится в нанокристаллическом состоянии.

Авторы приносят свои благодарности Юрию Николаевичу Стародубцеву за предоставленные образцы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стародубцев Ю. Н. Аморфные металлические материалы / Ю. Н. Стародубцев, В. Я. Белозеров // Силовая электроника. 2009. № 2, С. 86–89.
2. Стародубцев Ю. Н. Магнитные свойства аморфных и нанокристаллических сплавов: учебное пособие / Ю. Н. Стародубцев, В. Я. Белозеров. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2002, 366 с.
3. Herzer G. Grain structure and magnetism of nanocrystalline ferromagnets / G. Herzer // IEEE Trans. Magn. 1989. V. 25. P. 3327–3332.
4. Стародубцев Ю. Н. Нанокристаллические магнитомягкие материалы / Ю. Н. Стародубцев, В. Я. Белозеров // Компоненты и технологии. 2007. №4. С. 144–146.
5. Yoshizawa Y. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure / Y. Yoshizawa, S. Oguma, K. Yamauchi // J. Appl. Phys. 1988. V. 64. P. 6044–6046.